

# 水源水質の計測と上水道システムの水質管理・プロセス運転支援

Measurement of Water Quality in Water Supply Sources and Support System for Water Purification Plant Operation

行木 英明 平本 昭  
NAMEKI Hideaki HIRAMOTO Akira

近年、多様な原因物質による上水道水源の汚染が問題となり、突発的な水質事故も依然として多数発生している。このため、水源を含む上水道システム全体の水質を広域的かつ連続的に監視し、その情報に基づいて適切な浄水場プロセスの運転を行い、良質な水を安定して供給することが重要な課題となっている。

当社では、このような課題に対応するための新しい水質計測技術、水源水質情報に基づく取水水質予測シミュレーション技術、プロセス制御シミュレーション技術を開発してきた。更に、それらの要素技術を組み合わせ、上水道システム全体の水質管理及びプロセス運転を支援するためのシステム構築を検討している。

The problem of water pollution in water supply sources has recently arisen. To ensure a stable supply of high-quality drinking water, it is therefore important to operate water purification plants appropriately based on data from the continuous monitoring of water quality in water supply sources.

Toshiba has developed new water quality measurement technology, river pollutant dispersion simulation technology, and water purification process simulation technology in order to meet the above requirements. We have also been studying a system created by integrating these technologies to support water quality management and water purification plant operation.

## 1 まえがき

クリプトスポリジウムや内分泌かく乱化学物質、ダイオキシンによる水源の汚染、藻類に起因する異臭味発生、塩素処理時のトリハロメタン発生など、上水道における水質問題は多様化している。また、油や有害化学物質の水源への流入事故も依然として多く、水源を含む上水道システム全体の管理強化が求められている。水質問題の事例を図1に示す。

このような背景から、上水道では、水源水質を広域的かつ連続的に監視するとともに、その情報に基づいて適切な浄水場プロセスの運転を行い、良質な水を安定して供給することが重要な課題となっている。

ここでは、水質問題に対応するための新しい水質計測技術、水源水質情報をプロセスの運転に反映するための取水水質予測シミュレーション技術、プロセス制御シミュレーション技術について述べ、更に、それらの技術を組み合わせた水質管理・プロセス運転支援システムについて述べる。

## 2 新しい水質計測技術

水質問題に対応する新しい計測技術について述べる。これらは連続測定ができ、プロセス運転支援に応用できる。

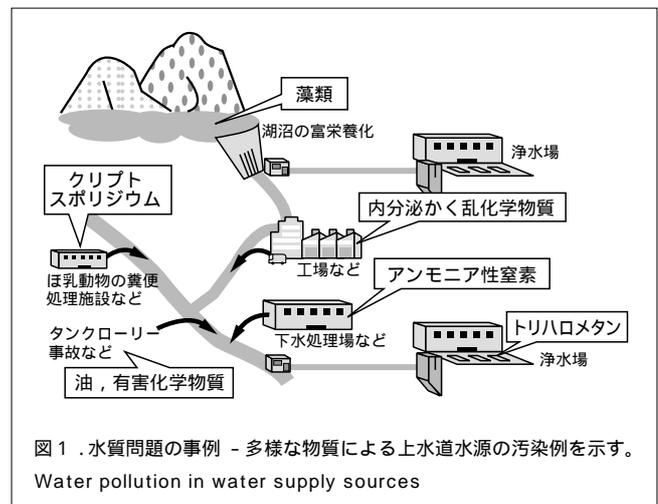


図1. 水質問題の事例 - 多様な物質による上水道水源の汚染例を示す。  
Water pollution in water supply sources

### 2.1 蛍光を用いた藻類濃度測定

藻類濃度測定は、藻類に起因する異臭味発生や凝集不良に対応するためのものである。異臭味除去にはオゾン処理が効果的であるが、オゾン処理設備がない場合、活性炭処理で異臭味を低減する。また、凝集不良を防ぐためには、藻類の流入に応じた凝集剤注入率やpHの調整が必要となる。藻類を水源や取水点で定量的に把握できれば、藻類濃度に応じた適切なプロセス運転の実現に貢献できる。

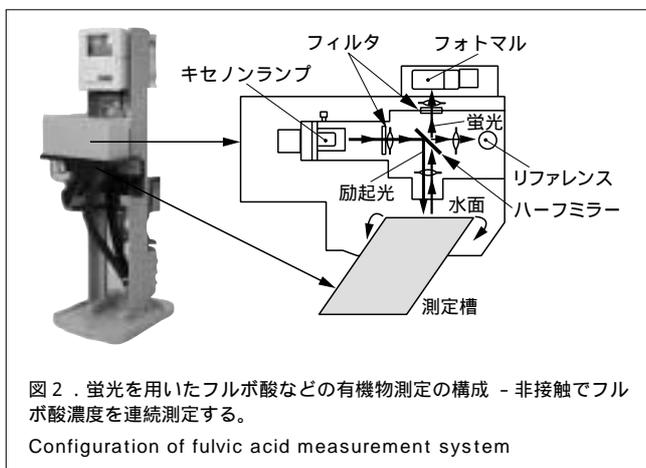
当社では、藻類に含まれる色素の蛍光特性に着目し、藻類

濃度測定技術の開発を進めている<sup>(3)</sup>。この技術は、有機物などに特定波長の励起光を照射すると、励起光より長い波長の蛍光を発生する現象を利用している。藻類は光合成を行うための色素として主にクロロフィルaを含み、藍藻(らんそう)類は特有の色素としてフィコシアニンを含む。クロロフィルaの蛍光特性は、励起波長435nm、蛍光波長678nm、フィコシアニンの蛍光特性は、励起波長600nm、蛍光波長642nmであり、フィコシアニン検出波長で藍藻を、クロロフィルa検出波長で藍藻以外の藻類を検出できる。

### 2.2 蛍光を用いたフルボ酸などの有機物測定

フルボ酸などの有機物測定は、トリハロメタン発生に対応するためのものである。トリハロメタン発生は、塩素処理前にフミン質などトリハロメタン前駆物質を除去すれば低減できるが、フミン質のうちフルボ酸は凝集沈殿で除去しにくく、活性炭処理やオゾン処理で対応する必要がある。フルボ酸を水源や取水点で定量的に把握できれば、フルボ酸濃度に応じた適切なプロセス運転の実現に貢献できる。

当社では、フルボ酸の蛍光特性に着目し、その測定技術の開発を進めている<sup>(4)</sup>。これまでに、フルボ酸濃度と、励起波長345nm、蛍光波長425nmの相対蛍光強度との相関を確認している。更に、従来の分光光度計によるバッチ式測定では、プロセス運転への反映が難しいため、図2に示すような装置構成とし、連続監視ができるようにした。

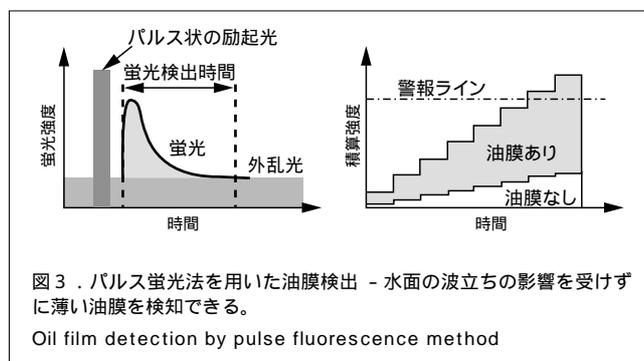


### 2.3 蛍光を用いた油膜の検出

油膜の検出は、水質事故による水道水源への油の流入に対応するためのものである。国土交通省によると、2000年の一級河川における水質事故は670件である(このうち上水道の取水停止を伴ったものが36件)。原因物質別では、油類が515件、化学物質(シアン、有機溶剤、農薬など)が43件、土砂・糞尿(ふんによう)などが25件、その他(原因不明)が87件となっている。水質事故発生時には、取水停止などの措置を迅速に行い、水道水の安全を確保する必要がある。

水質事故の情報は、事故の当事者や第一発見者の通報によって得られることが多いが、水源流域各所にセンサを設置し、油や有害化学物質を連続的に監視することにより早期発見の確率を高め、安全性を向上させることができる。

当社では、藻類やフルボ酸と同様、油膜についてもその蛍光特性に着目し、測定技術の開発を進めている<sup>(5)</sup>。油類の蛍光特性は種類によって異なるが、多くの場合、励起波長260nmに対する蛍光波長320nmでピークを持つ。蛍光を用いることで、水面の波立ちの影響を受けず、 $\mu\text{m}$ オーダーの薄い油膜を検知できる。更に、キセノンランプにより高強度の励起光をパルス状に照射し、蛍光発光タイミングに合わせて蛍光検出時間を設定し、また、蛍光強度を一定回数積算した値によって油膜検知を判定することで、従来は困難であった外乱光の存在する屋外に適用できるようにした(図3)。



### 2.4 微生物を用いた有害化学物質の監視

有害化学物質の監視は、水質事故による水道水源への有害化学物質流入に対応するためのものである。人体に影響を及ぼす化学物質は非常に多岐にわたり、すべての種類の物質を個別に監視することは事実上できない。そこで、生物に対する毒性を総合的に評価する手法が注目されている。

当社では、鉄酸化細菌を用いたバイオセンサ型水質監視支援装置を開発した<sup>(6)</sup>。鉄酸化細菌の呼吸活性は、有害化学物質によって阻害される。その結果生じる酸素消費量の変化を酸素電極によって測定し、水質異常を検知する。鉄酸化細菌は酸性環境で生息するため、他の微生物の影響を受けず、また、魚類による監視に比べてシアンなどの有害化学物質を高感度で検知できる。

## 3 取水水質予測シミュレーション技術

取水水質予測シミュレーション技術について、当社で開発した河川水質二次元分散シミュレータ<sup>(7)</sup>を例として説明する。この技術は、水源水質の情報に基づいて取水水質を予測することで、水質事故時の迅速な対応や水質変動時のプロセスの適切な運転を支援しようとするものである。

### 3.1 河川水質二次元分散シミュレータ

このシミュレータは、河川に流入した非分解性溶質が下流側にどのように分散していくかを計算する。分散モデルは、Taylorの分散理論に基づき四倉とSayreが提唱した「自然座標系二次元移流拡散流管モデル<sup>8)</sup>」を用いている。

### 3.2 シミュレータの構成

シミュレータは、流管モデル構築ツール、水質分散モデル、水質表示ツールなどで構成される。

流管モデル構築ツールでは、河川断面データを水位によって流断面データに変換し、水深分布に基づいて流断面の流量分布を推定する。次に流量を累積流量に変換し、流管モデルデータを自動作成する。

水質分散モデルでは、計算周期ごとに、非定常移流分散方程式の横分散項 $(\frac{1}{q} \frac{dC}{dx})$ を、流れ方向に分割した全断面*i*について計算し、次に移流項 $(u_x \frac{dC}{dx})$ をすべての流管*j*について計算し、水質濃度 $C(i, j)$ を求める。このアルゴリズムにより、二次元の水質分散予測が短時間でできるようになった。ここで、*q*は累積流量、*D<sub>z</sub>*は横分散係数、*x*は流れ方向距離、*u<sub>x</sub>*は流速を示す。

シミュレーションの例を図4に示す。この例は、モデル化した河川上流端に異常水質が5分間流入した場合の、流入から3時間後の濃度分布を示す。水質濃度分布は、河川地図上に等高線色階調アニメーション表示される。このシミュレータでは、河川の右岸、中央部、左岸での流達の違いを模擬でき、異常水質が流れ去るまでの時間を予測できる。

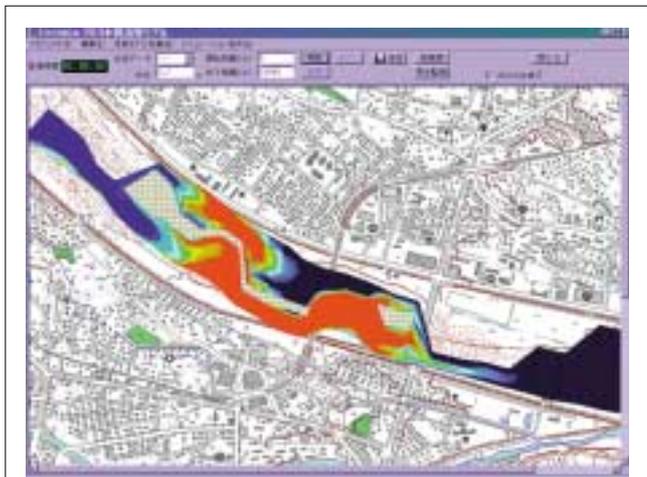


図4．水質分散シミュレーションの例 - 濃度分布は等高線色階調アニメーション表示される。

Example of contaminated solute dispersion simulation

## 4 プロセス制御シミュレーション技術

プロセス制御シミュレーション技術について、当社で開発

した浄水場水質制御シミュレータを例として説明する。この技術は、取水水質の変動に対するプロセス応答を予測し、プロセスの適切な運転を支援しようとするものである。

### 4.1 浄水場水質制御シミュレータの概要

このシミュレータは、塩素注入制御とpH制御を模擬し、原水の塩素消費物質やpH変動時に、制御パラメータ変更時のプロセス応答の変化を予測し、運転条件決定を支援する。

### 4.2 浄水場水質制御シミュレータのモデル

このシミュレータでは、水質反応モデル、制御モデル、遅れ系モデルなどが組み込まれたプロセス単位モデルを、GUI(Graphical User Interface)画面上でマウスを用いてはり付けることによって、個々の浄水場に対応した全体プロセスモデルを容易に構築できる。計算条件設定やシミュレーションの実行、グラフ表示などの操作もGUI画面上で行う。

- (1) 水質反応モデル 塩素注入制御プロセスでは、反応モデルとして、塩素との反応のしやすさによって分類された塩素消費物質のそれぞれに反応係数を定めて残留塩素を計算する“塩素消費モデル”、塩素消費物質としてアンモニアに着目した“塩素 - アンモニア反応モデル”などを組み込んでいる。pH制御プロセスでは、原水の緩衝能がpH調整剤注入後のpHに影響を及ぼすため、“炭酸塩モデル”を組み込んでいる。
- (2) 制御モデル 制御モデルとしては、実際の制御システムで採用されているPI(比例積分)制御のロジックを組み込んでいる。pH制御では、炭酸塩モデルで計算される緩衝能を考慮している。
- (3) 遅れ系モデル 高次の遅れ系は、混合槽列モデルを用いて模擬している。

### 4.3 プロセス制御シミュレーションの例

シミュレーションの例を図5に示す。この例は、塩素消費物質の変動に対する塩素注入制御の応答を予測したものである。グラフは、計算の進行と同期してGUI画面上に表示

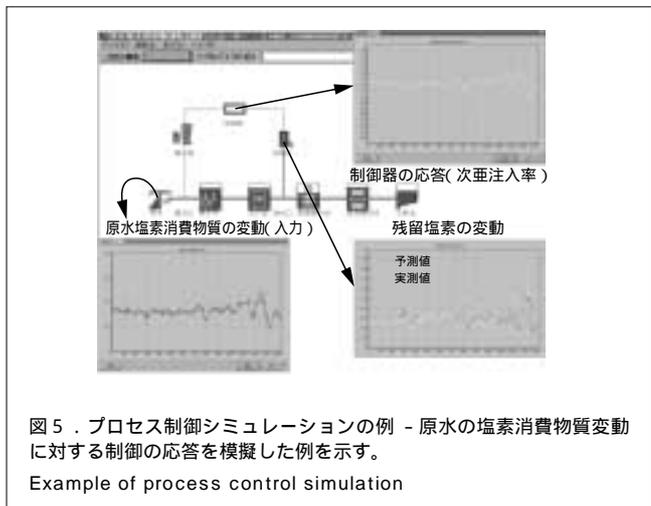


図5．プロセス制御シミュレーションの例 - 原水の塩素消費物質変動に対する制御の応答を模擬した例を示す。

Example of process control simulation

される。塩素消費物質濃度を計測していない場合でも、塩素注入率と残留塩素の時系列データから推定することができる。制御定数や制御目標値を変えたシミュレーションを行うことにより、想定される塩素消費物質の変動に対する最適な運転条件の検討ができる。

## 5 水質管理及びプロセス運転支援システム

当社では、これまで述べてきた新しい水質計測技術、水質分散シミュレーション技術、プロセス制御シミュレーション技術とを組み合わせたシステムを構築し、上水道の水質管理及びプロセス運転を支援することも検討している。

支援システムの構築例を図6に、プロセス運転支援メニューの例を表1に示す。

水源流域の各所に水質センサを設置し、連続して監視する。計測データはオンラインで流域の水質管理センター(仮称)に送られ、水質データサーバに保存・管理される。流域にある浄水場では、リアルタイムの水質データやサーバ上に保存された時系列水質データをセンターから取得し、水質管

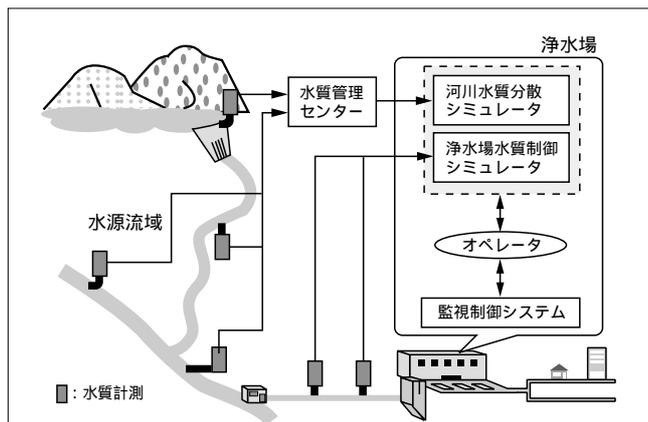


図6. 上水道の水質管理・プロセス運転支援システム - 水源水質の計測とシミュレーションを組み合わせて上水道システムの水質管理・プロセス運転を支援する。

Support system for water quality management and process operation

表1. プロセス運転支援メニュー

Contents of process operation support

項目	事象	支援メニュー
水質変動	濁度	凝集剤注入支援, 取水計画支援
	藻類	pH調整支援, 凝集剤注入支援, 異臭味除去支援
	アンモニアなど	塩素注入支援
	トリハロメタン前駆物質	活性炭注入支援, オゾン注入支援
水質事故	油類	取水停止決定支援
	有害化学物質	取水停止決定支援

理・プロセス運転に活用する。

水質データに大きな変動があった場合、浄水場では、河川水質分散シミュレータで取水水質の変動を予測し、更に取水水質予測結果に基づき、浄水場水質制御シミュレータで制御応答を予測する。水質制御オペレータは、これらの予測結果を参考として運転条件を決定する。また、水源流域の水質センサで油類や有害化学物質が検知された場合、センターから流域の浄水場に、水質事故の警報とともに水質データが送られる。浄水場では、河川水質分散シミュレータで流達を予測し、取水停止・再開などの措置を決定する。

## 6 あとがき

水源水質の計測と上水道システムの水質管理・プロセス運転支援として、新しい水質計測技術、取水水質予測シミュレーション技術、プロセス制御シミュレーション技術、及びそれらの技術を組み合わせた支援システムについて述べた。

今後は、水質計測やシミュレーションなどの個々の要素技術の高度化と融合を図り、安全で安定した水供給に貢献する支援システムの実現を目指していく。

## 文献

- (財)水道技術研究センター. 浄水技術ガイドライン(2000年版).
- 日本水道協会. 水道維持管理指針(1998年版).
- 原口 智,ほか. “蛍光分光法による藻類濃度測定技術”. 第50回全国水道研究発表会講演集. 1999, p.476 - 477.
- 林 巧,ほか. “蛍光測定の水質監視制御システムへの応用”. 第51回全国水道研究発表会講演集. 2000, p.512 - 513.
- 原口 智,ほか. “蛍光応用油膜センサの開発”. 第52回全国水道研究発表会講演集. 2001, p.642 - 643.
- 原口 智,ほか. “鉄酸化細菌による水質モニタリング”. 第51回全国水道研究発表会講演集. 2000, p.516 - 517.
- 三浦良輔,ほか. “2次元河川水質予測システムの検討”. 第50回全国水道研究発表会講演集. 1999, p.636 - 637.
- 四倉信弘,ほか. “河川における溶存物質の二次元輸送解析のための流管モデルについて”. 土木学会論文集 第399号/II-10. 1988, p.85 - 94.



行木 英明 NAMEKI Hideaki

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター システム研究開発部主務。上水道プラントの水処理技術の開発に従事後、現在、鉄道分野における列車制御技術の開発に従事。Power and Industrial Systems Research and Development Center



平本 昭 HIRAMOTO Akira

社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 社会システムエンジニアリング部グループ長。公共システムのエンジニアリング業務に従事。Public & Industrial Systems Div.